



УДК 621.396

DOI 10.18413/2411-3808-2019-46-3-573-581

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЖИТТЕРА НА ПРОЦЕСС ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ

### RESEARCH OF THE JITTER IMPACT ON THE DIGITAL FREQUENCY CONVERSION PROCESS

**И.А. Сидоренко, И.И. Лубков****I.A. Sidorenko, I.I. Lubkov**

Белгородский государственный национальный исследовательский университет,  
Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

Belgorod National Research University, 85 Pobedy St, Belgorod, 300815, Russia

E-mail: Sidorenko@bsu.edu.ru 817325@bsu.edu.ru

#### Аннотация

В статье описана имитационная модель цифрового преобразователя частоты, предназначенная для исследования влияния джиттера опорного генератора на процесс цифрового преобразования частоты (ЦПЧ). Модель разработана в среде компьютерного моделирования LabVIEW®. Приведены результаты воздействия на квадратурный М-QAM сигнал различных частот детерминированного джиттера и случайной составляющей джиттера (фазового шума). Показана паразитная амплитудная модуляция М-QAM сигнала, вносимая джиттером, его влияние на искажение спектра преобразованного сигнала. Приведена оценка полученных результатов. Разработаны практические рекомендации по реализации цифровых преобразователей частоты.

#### Abstract

The article describes a simulation model of a digital frequency converter, designed to study the influence of the reference generator jitter on the process of digital frequency conversion. This model was developed in the environment of computer simulation LabVIEW®. The model performs idealized up-and-down digital frequency conversion, and frequency conversion with the introduction of deterministic and phase jitter into the conversion process. Jitter parameters can be set and adjusted. Frequencies of deterministic jitter range from 100 Hz to 500 kHz. The results of the effect on the quadrature M-QAM signal of different frequencies of deterministic jitter and the random component of jitter (phase noise) are given. The parasitic amplitude modulation of the M-QAM signal introduced by jitter, its effect on the distortion of the spectrum of the converted signal is shown. Obtained the evaluation of the results. Developed practical recommendations for the implementation of digital frequency converters.

**Ключевые слова:** цифровое преобразование частоты, дискретизация, джиттер, имитационное моделирование, компьютерная модель, спектр сигнала.

**Keywords:** digital frequency conversion, sampling, jitter, simulation modeling, a computer model, signal spectrum.

---

#### Введение

В современных цифровых системах радиосвязи широко используют цифровые методы преобразования частоты как в радиопередающих, так и в радиоприемных устройствах. Они основаны на процессе дискретизации аналогового сигнала с последующим выделением копии исходного спектра на гармониках и субгармониках частоты дискретизации [Сергиенко, 2003; Ричард, 2006]. Основное преимущество цифровых методов преобразования частоты перед аналоговыми заключается в отсутствии нелинейных преобразований,



вызывающих внеполосные излучения в радиопередающих устройствах и побочные каналы приема в радиоприемных устройствах. Однако цифровые преобразователи частоты не являются идеальными устройствами, и их параметры зависят от различных факторов. К таким факторам относятся: параметры электронных компонентов, стабильность частоты тактового генератора, задающего частоту дискретизации, неидеальности фильтров.

Успехи в электронном приборостроении позволяют минимизировать влияния погрешностей, вносимых конденсатором и электронным ключом, путем усложнения архитектуры и применением более качественных компонентов [Гуменюк, Бочаров 2006, Гуменюк, Бочаров 2007]. Однако любой тактовый генератор всегда обладает конечной стабильностью частоты, изменение которой приводит к нарушению периода дискретизации, а, следовательно, и к дрожанию спектра преобразованного сигнала, внося искажения, не подлежащие компенсации в последующей цифровой обработке сигналов. Этот процесс характеризуется джиттером. Его невозможно полностью устранить ввиду обширного числа причин возникновения. Таким образом, ключевым фактором, влияющим на качество работы цифрового преобразователя частоты, является джиттер опорного генератора.

Поэтому научная задача, состоящая в исследовании влияния джиттера на качество работы цифрового преобразователя частоты, является актуальной.

### Объекты и методы исследования

Целью статьи является описание имитационной модели цифрового преобразователя частоты, позволяющей проводить экспериментальные исследования влияния джиттера опорного генератора на процесс цифрового преобразования частоты.

Целью статьи является описание воздействия джиттера опорного генератора на процесс цифрового преобразования частоты на основе имитационного моделирования.

Для достижения поставленной цели необходимо выбрать среду моделирования и разработать имитационную модель цифрового преобразователя частоты. Имитационная модель цифрового преобразователя частоты должна обеспечивать следующие функции:

- Реализовывать цифровое преобразование частоты сигнала вверх и вниз;
- Осуществлять повышающее и понижающее преобразование как с использованием идеальной, так и с использованием дрожащей частоты передискретизации (с джиттером).
- Отображать спектрограммы и осциллограммы сигнала на всех этапах преобразования.
- Генерировать сигнал, моделированный определенной информационной последовательностью битов.

Важной особенностью моделируемого процесса является невозможность непосредственной дискретизации аналогового сигнала, так как в любом случае в компьютере он уже будет представлен своими отсчетами. Следовательно, в процессе моделирования будет фактически осуществляться передискретизация уже дискретного сигнала.

Для разработки компьютерной модели цифрового преобразователя частоты была выбрана среда моделирования LabVIEW<sup>®</sup>, так как данная среда имеет обширные возможности для создания интерфейса программы, способна одновременно проводить измерения, обработку данных и визуализацию процессов. Так же в LabVIEW<sup>®</sup> присутствуют специализированные блоки для моделирования сигнала с джиттером с возможностью задавать характеристики и параметры дрожания, строить глазковые диаграммы, гистограммы, спектрограммы джиттера [Cory, 2005; Федосов, Нестеренко, 2007].

Для корректной разработки имитационной модели, позволяющей исследовать воздействие джиттера опорного генератора на процесс цифрового преобразования частоты, было проведено изучение ряда отечественных и зарубежных книг и статей [Wegman, Vittoz, Rahali, 1987; Dai, Harjani, 2000; Vankka 2005; Овчинников, Галкин, Варукин, 2006; Derek, Eric, Alison, 2006; Бельчиков 2009; Carlos 2011; Галкин, 2012; José, García, et. al 2012].

Создание модели осуществлялось в следующие этапы:

- 1) Разработка блока генерации сигнала, модулированного квадратурной модуляцией QAM-4, QAM-16, QAM-64;
- 2) Создание алгоритма, осуществляющего идеальную передискретизацию квадратурного сигнала;
- 3) Генерация сигнала с джиттером с возможностью регулирования параметров дрожания;
- 4) Разработка алгоритма, осуществляющего выборку в соответствии с частотой управляющего сигнала тактового генератора с регулируемым уровнем джиттера;

Для удобства проведения исследования было разработано несколько вариантов модели:

1) Наглядное цифровое повышающее преобразование QAM сигнала без джиттера, с последующим цифровым понижающим преобразованием и демодуляцией сигнала с построением сигнального созвездия (рис. 1).

2) Повышающее цифровое преобразование QAM модулированного сигнала с использованием идеальной передискретизации и передискретизации с дрожанием частоты дискретизации. Отображая спектрограммы и осциллограммы всех основных этапов преобразования (рис. 2).

3) Преобразование QAM сигнала с повышением частоты классическим методом при помощи гетеродина с последующим понижающим преобразованием с использованием субдискретизации. Параллельно осуществляются идеальная субдискретизация и субдискретизация с дрожанием частоты дискретизации (рис. 3).



Рис. 1. Функциональная схема первого варианта модели

Fig. 1. Functional diagram of the first version of the model



Рис. 2. Функциональная схема второго варианта модели

Fig. 2. Functional diagram of the second version of the model

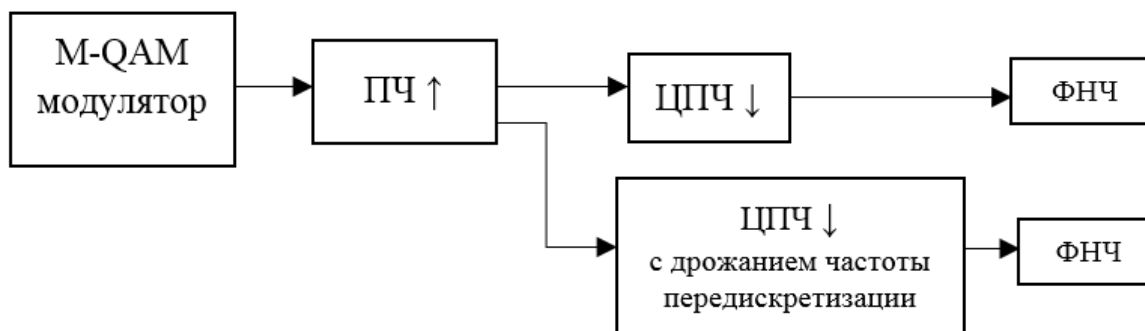


Рис. 3. Функциональная схема третьего варианта модели

Fig. 3. Functional diagram of the third version of the model

### Результаты и их обсуждение

Для исследования влияния джиттера на процесс цифрового преобразования частоты сформирован сигнал QAM-16. Частота дискретизации исходного сигнала 48 МГц, продолжительность 0,08 с. (рис. 4).

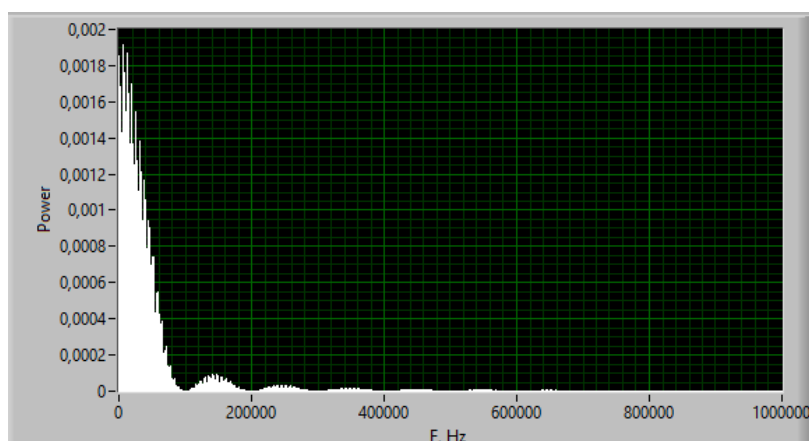


Рис. 4. Спектр исходного сигнала QAM-16

Fig. 4. Spectrum of the original QAM-16 signal

Далее сигнал был преобразован цифровым преобразователем частоты с идеальной частотой передискретизации 2 МГц, что привело к появлению копий спектра сигнала на гармониках частоты передискретизации (рис. 5).

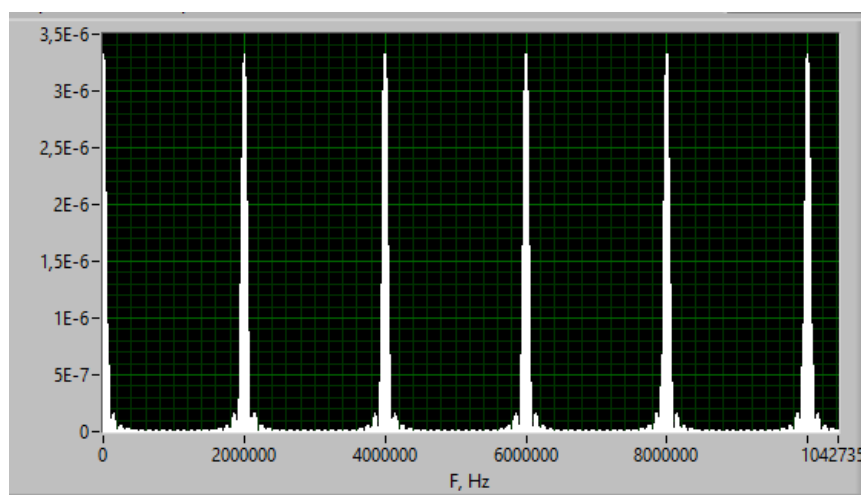


Рис. 5. Идеальная передискретизация

Fig. 5. Idealized subsampling

Используя второй вариант модели, произведено цифровое повышающее преобразование частоты исходного сигнала с дрожанием частоты дискретизации. Использовались различные частоты детерминированного джиттера при неизменной величине фазового шума, т. к. уровни фазовых шумов современных синтезаторов частот не оказывают существенного влияния на преобразуемый сигнал. Далее представлены результаты воздействия детерминированного джиттера, 100 Гц, 1 кГц, 100 кГц, 500 кГц соответственно (рис. 6).

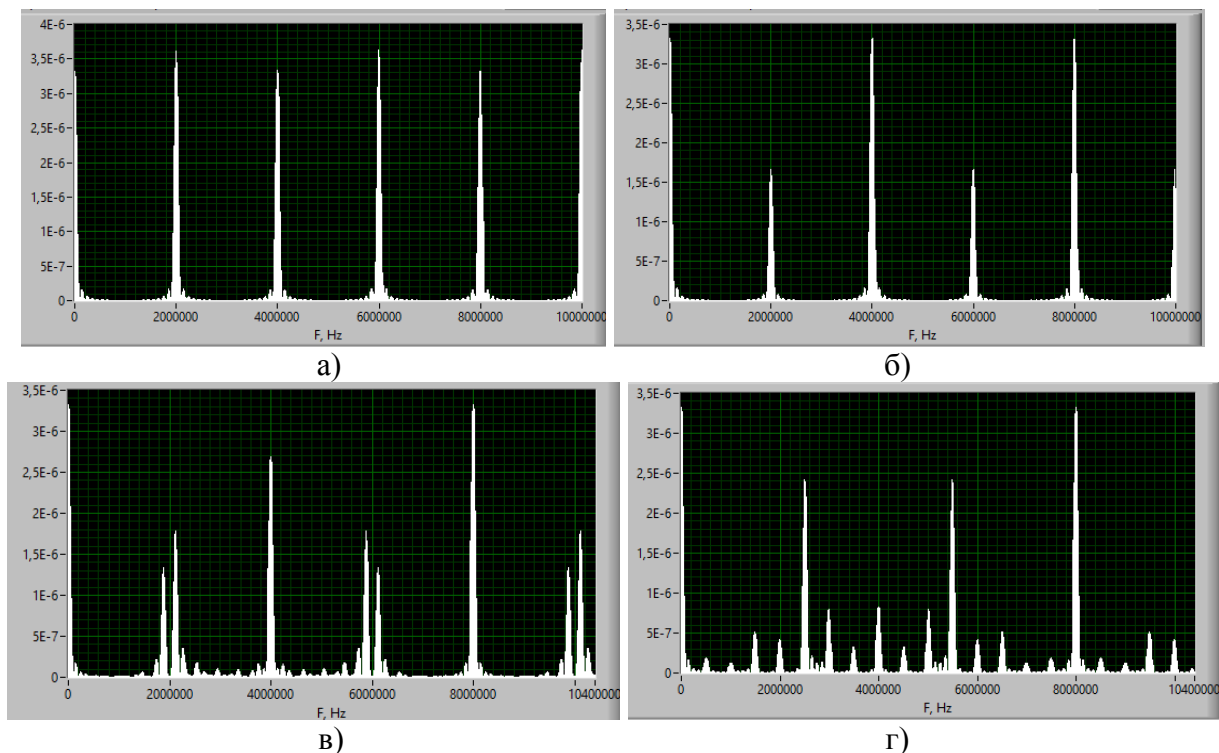


Рис. 6. Воздействие детерминированного джиттера: а) 100 Гц; б) 1 кГц;  
в) 100 кГц; г) 500 кГц

Fig. 6. The impact of deterministic jitter: а) 100 Hz; б) 1 kHz;  
с) 100 kHz; д) 500 kHz

При помощи третьего варианта модели осуществлено понижающее преобразование сигнала QAM-16 с центральной частотой спектра 8 МГц. Частота субдискретизации равна 2 МГц согласно формуле (1):

$$\frac{(2F_c - B)}{m} \geq F_s \geq \frac{(2F_c + B)}{m+1}, \quad (1)$$

где  $F_c$  – средняя частота спектра полосового сигнала, Гц,

$B$  – ширина спектра полосового сигнала, Гц,

$m$  – произвольное положительное целое число, выбираемое так, чтобы выполнялось соотношение  $F_s \geq 2B$ . [2]

Далее представлено идеальное понижающее преобразование частоты и исходный спектр сигнала (рис. 7).

По полученным данным видно, что детерминированный джиттер оказывает идентичное влияние на цифровое преобразование с повышением и понижением частоты. С увеличением частоты детерминированных составляющих повышается степень искажения спектра. При частоте передискретизации 2 МГц как в повышающем, так и в понижающем преобразовании частоты джиттера свыше десятков кГц оказывают сильное искажающее воздействие на спектр сигнала.

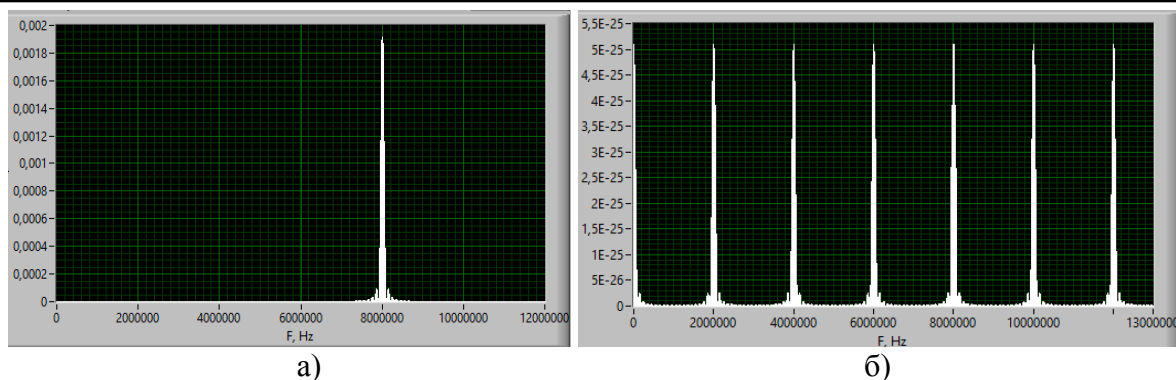


Рис. 7. а) Спектр QAM-16 на частоте 8 МГц; б) Идеальное понижающее преобразование  
Fig. 7. а) QAM-16 spectrum at a frequency of 8 MHz; б) Idealized downconversion

Представлены результаты воздействия детерминированного джиттера, 100 Гц, 200 Гц, 1 кГц, 100 кГц на понижающее цифровое преобразование частоты (рис. 8).

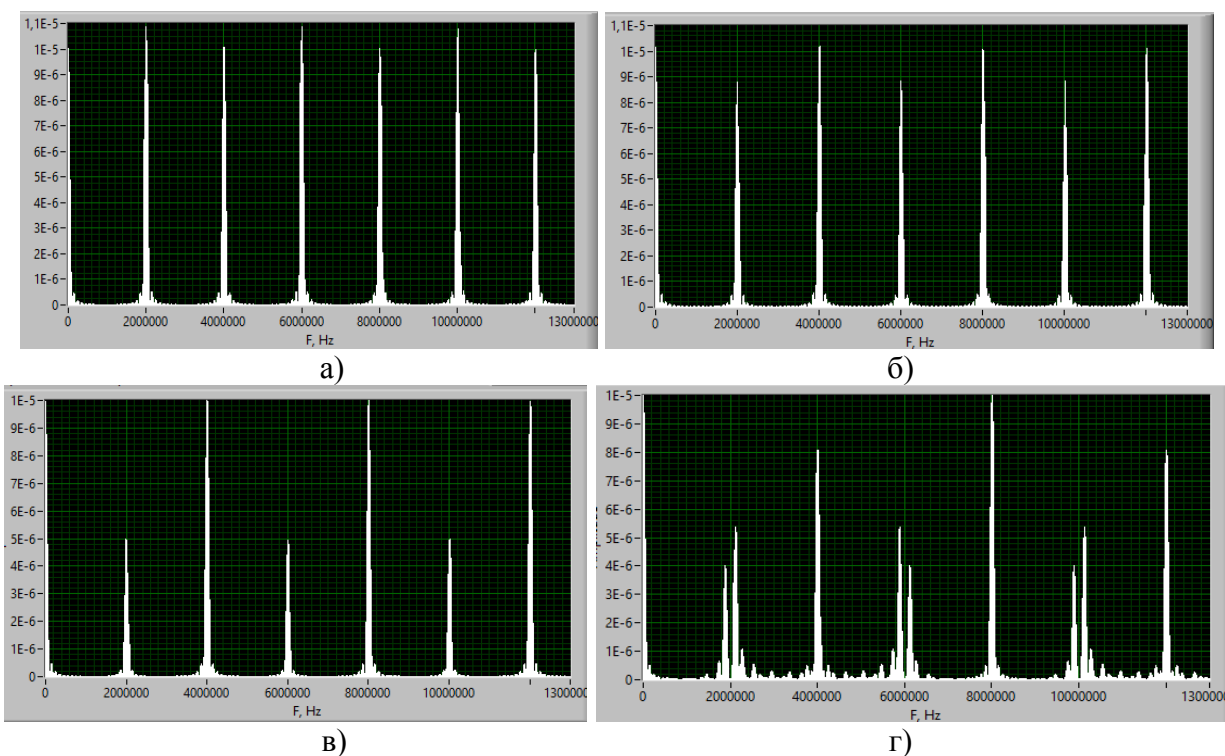


Рис. 8. Воздействие детерминированного джиттера: а) 100 Гц; б) 200 Гц;  
в) 1 кГц; г) 100 кГц  
Fig. 8. The impact of deterministic jitter: а) 100 Hz; б) 200 Hz;  
с) 1 kHz; д) 100 kHz

Для анализа воздействия джиттера на амплитуду сигнала проведено цифровое преобразование частоты сигнала с идеальной частотой дискретизации и дрожанием частоты дискретизации (рис. 9).

На идентичных участках сигнала рассчитаны процентные разности отсчетов при идеальной дискретизации и добавлении различных частотных составляющих детерминированного джиттера. График зависимости процентной разности от номера отсчета представлен далее (рис. 10).

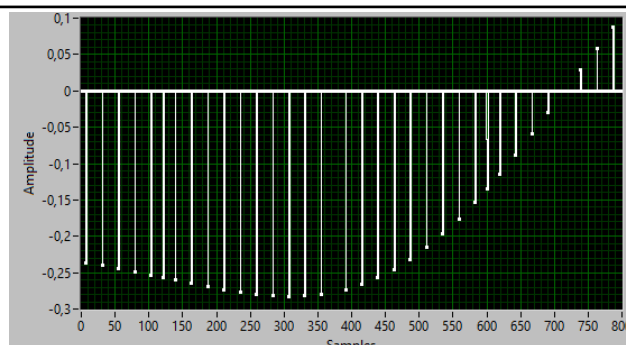


Рис. 9. Передискретизация 2 МГц с детерминированным джиттером 100 кГц  
Fig. 9. Resampling 2 MHz with 100 kHz deterministic jitter

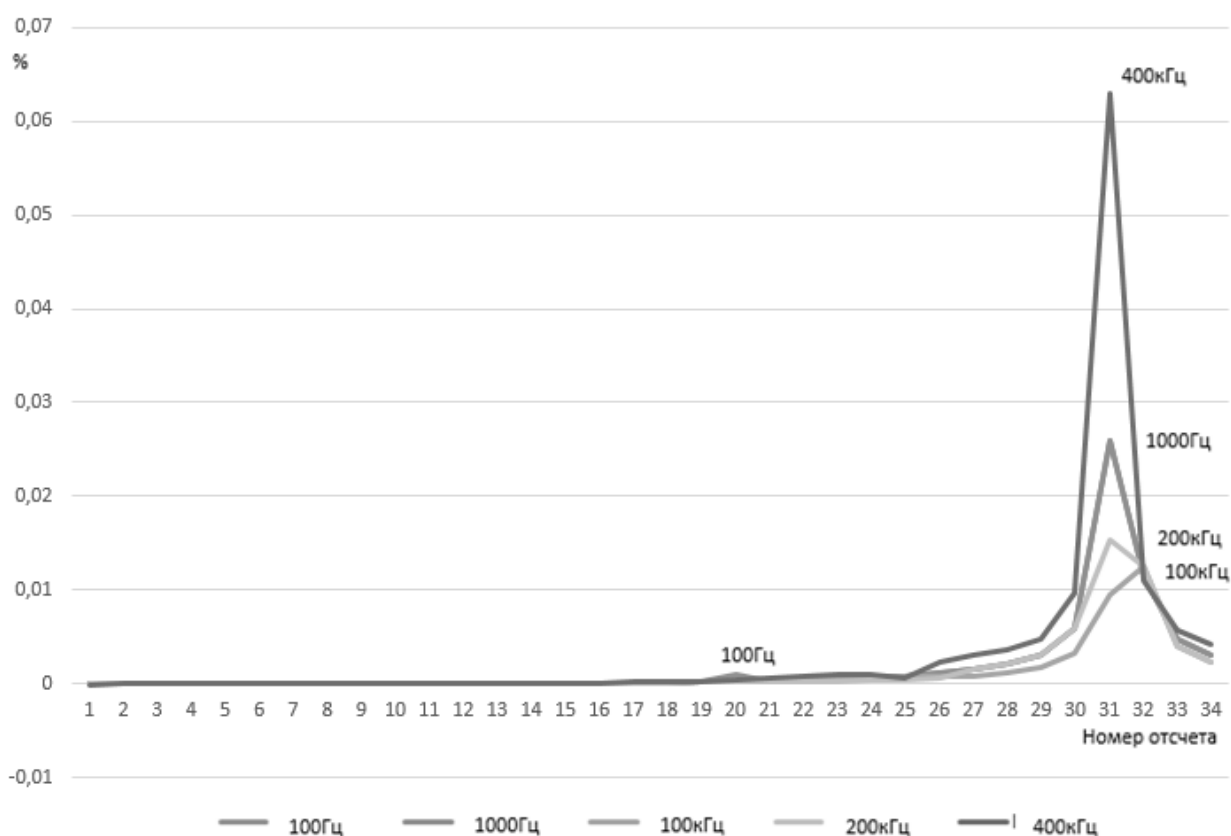


Рис. 10. Процентная разность амплитуды отсчетов сигнала с идеализированной дискретизацией и сигнала с различными частотами детерминированного джиттера  
Fig. 10. The percentage difference between the amplitude of signal samples from idealized sampling and signals with different frequencies deterministic jitter

По полученным данным видно, что частота детерминированного джиттера не оказывает сильного влияния на амплитуду сигнала, большее влияние оказывает крутизна участка сигнала и, как следствие, частота самого сигнала.

Также сильному воздействию подвергнуты отсчеты вблизи границы перехода между отрицательной и положительными областями, что видно по отсчетам 30–32. В этой области наибольшее влияние оказал детерминированный джиттер с частотой 400 кГц.

### Заключение

Результаты, полученные в ходе моделирования воздействия джиттера опорного генератора на процесс цифрового преобразования частоты, позволяют сделать ряд выводов.





Низкочастотные составляющие детерминированного джиттера оказывают минимальное воздействие на преобразование частоты. Однако с увеличением частоты детерминированного джиттера и приближением ее к частоте дискретизации вносимые искажения увеличиваются. Образуются ложные гармоники, смещаются копии исходного спектра сигнала. Влияние, оказываемое на спектр сигнала при цифровом повышающем и понижающем преобразовании частоты, идентично и не зависит от типа преобразования.

Уровень фазового шума, сопоставимый с уровнем в реальных синтезаторах частот, не оказывает существенного влияния как на амплитуду, так и на спектр сигнала.

Изменение частоты детерминированного джиттера практически не оказывает влияния на амплитуду сигнала на пологих участках и повышает отклонение от истинного значения с увеличением крутизны участка сигнала и приближение к оси координат. Тем самым с увеличением частоты преобразуемого сигнала увеличивается погрешность амплитуды, вносимая джиттером.

При разработке цифровых преобразователей частоты особое внимание следует уделить борьбе с высокочастотными составляющими детерминированного джиттера и близкими по значению с частотой дискретизации, так как именно они вносят наибольшие искажения.

### Список литературы

1. Бельчиков С. 2009. Фазовый шум. Компоненты и технологии, 5: 139–146.
2. Галкин В.А. 2012. Цифровая мобильная радиосвязь. М., Горячая линия Телеком, 432.
3. Гуменюк А.С., Бочаров Ю.И. 2006. Проектирование дифференциальных КМОП усилителей для АЦП. Схемотехника, 12: 2–6.
4. Гуменюк А.С., Бочаров Ю.И. 2007. Устройства выборки-хранения быстродействующих АЦП. Микроэлектроника, 36 (5): 390–400.
5. Овчинников А.М., Галкин В.А., Варукин Е.П. 2006. Измерение параметров средств цифровой радиосвязи. Технологии и средства связи, 3: 56–68.
6. Ричард Л. 2006. Цифровая обработка сигналов: Второе издание. Пер. с англ. М., ООО «Бином-Пресс», 656.
7. Сергиенко А.Б. 2003. Цифровая обработка сигналов. СПб., Питер. 604.
8. Сидоренко И.А., Лубков И.И. 2016. Компьютерное моделирование цифрового преобразователя частоты. Научный результат. Информационные технологии. 1(3): 61–65.
9. Статья «Измерение джиттера в цифровых системах». Электронный ресурс. URL: <http://www.unitest.com/theory/jitter.html> (дата обращения 18.03.2019)
10. Статья «Измерение джиттера». Электронный ресурс. Журнал сетевых решений. URL: <https://www.osp.ru/lan/2006/02/377747/> (дата обращения 15.03.2019)
11. Федосов В.П., Нестеренко А.К. 2007. Цифровая обработка сигналов в LabVIEW. М., ДМК Пресс, 456.
12. Carlos A-L. 2011. Clock Jitter Effect on Sampling. IEEE Circuits and systems magazine. 26–37.
13. Cory L. 2005. LabVIEW Digital Signal Processing and Digital Communication. McGraw-Hill Companies. 2005, 225.
14. Dai L., Harjani R. 2000. CMOS Switched-Op-Amp-Based Sample-and-Hold Circuit. IEEE J. Solid-State Circuits, 35 (1): 109–113.
15. Derek R, Eric T, Alison S. 2006. Understanding the Effect of Clock Jitter on High Speed ADCs. LINEAR technology, 1013.
16. Fundamentals of Sampling Data Systems. Available at: [www.analog.com](http://www.analog.com). Application Note AN-282. (accessed 25 February 2019)
17. José R. García O, et. al. 2012. Subsampling Receivers with Applications to Software Defined Radio Systems. In-tech. 165–194.
18. The Fundamentals of FFT-Based Signal Analysis and Measurement in LabVIEW and LabWindows. CVI (National Instruments). Available at: <http://www.ni.com/white-paper/4278/en/> (accessed 20 February 2019)
19. Vankka J. 2005. Digital Synthesizers and Transmitters for Software Radio. Springer, 359.
20. Wegmann G., Vittoz E., Rahali F. 1987. Charge Injection in Analog MOS Switches. IEEE J. Solid-State Circuits, 22. (6): 1091–1097.



## References

1. Belchikov S. 2009. Fazovyy shum [Phase noise]. Komponenty i tekhnologii, 5: 139–146.
2. Galkin V.A. 2012. Cifrovaya mobil'naya radiosvyaz [Digital Mobile Radio]. Moscow: Goryachaya liniya Telekom, 432.
3. Gumenyuk A.C., Bocharov Yu.I. 2006. Proektirovanie differentsial'nyh KMOP usilitelej dlya ACP [Designing differential CMOS amplifiers for ADC], Skhemotekhnika, 12: 2–6.
4. Gumenyuk A.S., Bocharov YU.I. 2007. Ustrojstva vyborki-hraneniya bystrodejstvuyushchih ACP. Mikroelektronika, [Devices sample and hold fast ADC. Microelectronics] 36 (5): 390–400.
5. Ovchinnikov A.M., Galkin V.A., Varukin E.P. 2006. Izmerenie parametrov sredstv cifrovoy radiosvyazi [Measurement of parameters of digital radio communications]. Tekhnologii i sredstva svyazi, 3: 56–68.
6. Richard L. 2004. Understanding Digital Signal Processing, 2nd Edition, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall PTR2004. 621.
7. Sergienko A.B. 2003. Cifrovaya obrabotka signalov [Digital Signal Processing]. SPb., Peter. 604.
8. Sidorenko I.A., Lubkov I.I. 2016. Computer simulation of digital frequency converter. Research-result. Information technologies. 1(3): 61–65.
9. Article «Izmerenie dzhittera v cifrovyyh sistemah». Available at: <http://www.unitest.com/theory/jitter.html> (accessed 18 February 2019).
10. Article «Izmerenie dzhittera». ZHurnal setevykh reshenij. Available at: <https://www.osp.ru/lan/2006/02/377747/> (accessed 15 February 2019).
11. Fedosov V.P., Nesterenko A.K. 2007. Cifrovaya obrabotka signalov v LabVIEW [Digital Signal Processing in LabVIEW]. Moscow., DMK Press, 456.
12. Carlos A-L. 2011. Clock Jitter Effect on Sampling. IEEE Circuits and systems magazine. 26–37.
13. Cory L. 2005. LabVIEW Digital Signal Processing and Digital Communication. McGraw-Hill Companies. 2005, 225.
14. Dai L., Harjani R. 2000. CMOS Switched-Op-Amp-Based Sample-and-Hold Circuit. IEEE J. Solid-State Circuits, 35 (1): 109–113.
15. Derek R, Eric T, Alison S. 2006. Understanding the Effect of Clock Jitter on High Speed ADCs. LINEAR technology, 1013.
16. Fundamentals of Sampling Data Systems. Available at: [www.analog.com](http://www.analog.com). Application Note AN-282. (accessed 25 February 2019)
17. José R. García O, et. al. 2012. Subsampling Receivers with Applications to Software Defined Radio Systems. In-tech. 165–194.
18. The Fundamentals of FFT-Based Signal Analysis and Measurement in LabVIEW and LabWindows. CVI (National Instruments). Available at: <http://www.ni.com/white-paper/4278/en/> (accessed 20 February 2019)
19. Vankka J. 2005. Digital Synthesizers and Transmitters for Software Radio. Springer, 359.
20. Wegmann G., Vittoz E., Rahali F. 1987. Charge Injection in Analog MOS Switches. IEEE J. Solid-State Circuits, 22. (6): 1091–1097.

## Ссылка для цитирования статьи Reference to article

Сидоренко И.А., Лубков И.И. 2019. Исследование влияния джиттера на процесс цифрового преобразования частоты. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 46 (3): 573–581. DOI 10.18413/2411-3808-2019-46-3-573-581.

Sidorenko I.A., Lubkov I.I. 2019. Research of the jitter impact on the digital frequency conversion process. Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics. Information technologies. 46 (3): 573–581 (in Russian). DOI 10.18413/2411-3808-2019-46-3-573-581.